

# 量子信息技术发展与应用 研究报告 (2019 年)

中国信息通信研究院  
2019年12月

---

## 版权声明

---

本白皮书版权属于中国信息通信研究院，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本白皮书文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院”。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。

## 前 言

量子信息技术以微观粒子系统为操控对象，借助其中的量子叠加态和量子纠缠效应等独特物理现象进行信息获取、处理和传输，能够在提升运算处理速度、信息安全保障能力、测量精度和灵敏度等方面带来原理性优势和突破经典技术瓶颈。量子信息技术已经成为信息通信技术演进和产业升级的关注焦点之一，在未来国家科技发展、新兴产业培育、国防和经济建设等领域，将产生基础共性乃至颠覆性重大影响。

近年来，以量子计算、量子通信和量子测量为代表的量子信息技术的研究与应用在全球范围内加速发展，各国纷纷加大投入力度和拓宽项目布局。三大领域的技术创新活跃，专利与论文增长较为迅速，重要研究成果和舆论热点层出不穷。我国量子信息技术研究和应用探索具备良好的实践基础，加大支持力度，突破瓶颈障碍，聚力加快发展，有望实现与国际先进水平并跑领跑。

为推动我国量子信息技术应用探索和产业化健康发展，中国信息通信研究院在 2018 年发布研究报告基础上，组织编写了《量子信息技术发展与应用研究报告》（2019 年），深入分析量子信息技术三大领域的关键技术、热点问题、发展现状、演进趋势，阐述我国面临的机遇与挑战，以及未来发展态势。

CAICT 中国信通院

# 目 录

一、量子信息技术总体发展态势 .....	1
(一) 量子信息技术成为未来科技发展关注焦点之一 .....	1
(二) 各国加大量子信息领域的支持投入和布局推动 .....	2
(三) 量子信息技术标准化研究受到重视并加速发展 .....	4
(四) 量子信息技术创新活跃, 论文和专利增长迅速 .....	6
二、量子计算领域研究与应用进展 .....	11
(一) 物理平台探索发展迅速, 技术路线仍未收敛 .....	11
(二) “量子优越性”突破里程碑, 实用化尚有距离 .....	12
(三) 量子计算云平台成为热点, 发展方兴未艾 .....	14
(四) 产业发展格局正在形成、生态链不断壮大 .....	16
(五) 应用探索持续深入, “杀手级应用”或可期待 .....	19
三、量子通信领域研究与应用进展 .....	20
(一) 量子通信技术研究和样机研制取得新成果 .....	20
(二) 量子密钥分发技术演进关注提升实用化水平 .....	23
(三) 量子保密通信应用探索和产业化进一步发展 .....	25
(四) 量子保密通信网络现实安全性成为讨论热点 .....	27
(五) 量子保密通信规模化应用与产业化仍需探索 .....	29
四、量子测量领域研究与应用进展 .....	32
(一) 量子测量突破经典测量极限, 应用领域广泛 .....	32
(二) 自旋量子位测量有望实现芯片化和集成应用 .....	36
(三) 量子纠缠测量处于前沿研究, 实用尚有距离 .....	37
(四) 超高精度量子时钟同步有望助力未来通信网 .....	38
(五) 量子测量产业初步发展, 仍需多方助力合作 .....	40
五、量子信息技术发展与应用展望 .....	42
(一) 理论与关键技术待突破, 领域发展前景各异 .....	42
(二) 我国具备良好的实践基础, 机遇和挑战并存 .....	45

CAICT 中国信通院

## 图 目 录

图 1 欧盟“量子宣言”旗舰计划首批科研项目 .....	3
图 2 量子计算领域专利申请及授权情况.....	7
图 3 量子计算领域发表论文趋势及主要发文机构.....	8
图 4 量子通信领域专利申请和专利授权发展趋势.....	8
图 5 量子通信领域论文发表趋势及主要发文机构.....	9
图 6 量子测量领域专利申请和论文发表趋势.....	10
图 7 Google Sycamore 超导量子计算处理器.....	13
图 8 量子计算云平台通用体系架构.....	15
图 9 美国量子计算研究与应用发展模式.....	17
图 10 量子计算领域科技公司和初创企业分布.....	18
图 11 量子计算研发主体与产业应用生态.....	19
图 12 量子安全直接通信原理样机实验系统.....	22
图 13 我国 QKD 领域主要研究机构和设备商.....	26
图 14 量子测量的基本流程和主要步骤.....	33
图 15 外界物理量与量子体系的作用机制.....	34
图 16 量子测量主要应用领域和技术体系.....	35
图 17 高精度时钟同步在通信网络中的应用.....	39
图 18 量子测量科研及产业发展情况.....	41
图 19 量子信息技术发展与应用趋势展望.....	44

CAICT 中国信通院



## 一、量子信息技术总体发展态势

### （一）量子信息技术成为未来科技发展关注焦点之一

随着人类对于量子力学原理的认识、理解和研究不断深入，以及对于微观物理体系的观测和调控能力不断提升，以微观粒子系统（如电子、光子和冷原子等）为操控对象，借助其中的量子叠加态和量子纠缠效应等独特物理现象进行信息获取、处理和传输的量子信息技术应运而生并蓬勃发展。量子信息技术主要包括量子计算、量子通信和量子测量三大领域，可以在提升运算处理速度、信息安全保障能力、测量精度和灵敏度等方面突破经典技术的瓶颈。量子信息技术已经成为信息通信技术演进和产业升级的关注焦点之一，在未来国家科技发展、新兴产业培育、国防和经济建设等领域，将产生基础共性乃至颠覆性重大影响。

量子计算以量子比特为基本单元，利用量子叠加和干涉等原理进行量子并行计算，具有经典计算无法比拟的巨大信息携带和超强并行处理能力，能够在特定计算困难问题上提供指数级加速。量子计算带来的算力飞跃，有可能在未来引发改变游戏规则的计算革命，成为推动科学技术加速发展演进的“触发器”和“催化剂”。未来可能在实现特定计算问题求解的专用量子计算处理器，用于分子结构和量子体系模拟的量子模拟机，以及用于机器学习和大数据集优化等应用的量子计算新算法等方面率先取得突破。

量子通信利用量子叠加态或量子纠缠效应等进行信息或密钥传

输，基于量子力学原理保证传输安全性，主要分量子隐形传态和量子密钥分发两类。量子密钥分发基于量子力学原理保证密钥分发的安全性，是首个从实验室走向实际应用的量子通信技术分支。通过在经典通信中加入量子密钥分发和信息加密传输，可以提升网络信息安全保障能力。量子隐形传态在经典通信辅助之下，可以实现任意未知量子态信息的传输。量子隐形传态与量子计算融合形成量子信息网络，是未来量子信息技术的重要发展方向之一。

量子测量基于微观粒子系统及其量子态的精密测量，完成被测系统物理量的执行变换和信息输出，在测量精度、灵敏度和稳定性等方面比传统测量技术有明显优势。主要包括时间基准、惯性测量、重力测量、磁场测量和目标识别等方向，广泛应用于基础科研、空间探测、生物医疗、惯性制导、地质勘测、灾害预防等领域。量子物理常数和量子测量技术已经成为定义基本物理量单位和计量基准的重要参考，未来量子测量有望在生物研究、医学检测以及面向航天、国防和商业等应用的新一代定位、导航和授时系统等方面率先获得应用。

## （二）各国加大量子信息领域的支持投入和布局推动

以量子计算、量子通信和量子测量为代表的量子信息技术已成为未来国家科技发展的重要领域之一，世界科技强国都对其高度重视。近年来，欧美国家纷纷启动了国家级量子科技战略行动计划，大幅增加研发投入，同时开展顶层规划及研究应用布局。

英国 2015 年正式启动“国家量子技术计划”，投资 2.7 亿英镑建立量子通信、传感、成像和计算四大研发中心，开展学术与应用研究。

2018 年 11 月进行了第二阶段 2.35 亿英镑投资拨款。德国在 2018 年 9 月提出“量子技术——从基础到市场”框架计划，拟于 2022 年前投资 6.5 亿欧元促进量子技术发展与应用，并可延长资助至 2028 年。

量子通信方向			
连续变量量子通信	CiViQ	ICFO, 西班牙	基于PIC的CV-QKD系统, 面向电信运营商的网络部署和应用验证
量子互联网联盟	QIA	Delft, 荷兰	基于量子中继器的量子隐形传态网络, 连接量子计算平台物理比特
量子随机数生成器	QRANGE	Geneva, 瑞士	集成化CMOS工艺SPAD, 随机数产生速率 > 10Gbps 芯片化QRNG
实用化量子通信	UNIQUORN	AIT, 奥地利	InP平台量子片上系统, 可用于量子隐形传态、单光子QKD和压缩态
量子计算+模拟方向			
离子阱量子计算	AQTION	Innsbruck, 奥地利	可扩展离子阱量子计算物理平台及多激光器操控系统, 全自动运行
开放超导量子计算机	OpenSuerQ	Saarländers, 德国	开放式超导量子计算机硬件+软件+优化工具, 50-100量子比特
可编程原子大规模量子模拟	PASQuanS	Max-Planck, 德国	500位中性原子和离子平台量子模拟器, 面向量子退火与优化问题
级联激光器频率梳量子模拟	Qombs	Consiglio, 意大利	光学晶格超冷原子量子模拟器, 研究载波传输量子动态效应和传感
量子测量方向			
金刚石色心量子测量	ASTERIQS	Thales, 法国	固态金刚石NV色心探针, 高动态范围多用途量子传感器
集成化量子钟	iqClock	Amsterdam, 荷兰	集成化光原子晶格钟, 小型化铯原子钟, 超辐射原子钟
微型原子气室量子测量	MACQSIMAL	CSEM, 瑞士	基于MEMS原子蒸汽腔的量子陀螺、量子重力仪和气体传感器
金刚石动态量子多维成像	MetaboliQs	Fraunhofer, 德国	基于金刚石NV色心偏振器的超极化磁共振 (MRI) 医学成像
量子基础科研			
二维量子PIC材料与器件	2D-SIPC	ICFO, 西班牙	用于可扩展集成光子电路 (PIC) 的二维量子材料和器件集成
微波驱动离子阱量子计算	MicroQC	TCFA, 保加利亚	微波控制微加热技术多比特离子阱逻辑门和量子处理器设计
亚泊松分布光子枪	PhoG	Andrews, 英国	集成化高确定性非传统光源, 如亚泊松分布光源和多模纠缠光源
基于光子的量子模拟	PhoQuS	Sorbonne, 法国	基于多光子量子超流体和量子湍流状态的量子模拟新平台
量子微波计算和传感	QMICS	Bayerische, 德国	微波频段单光子探测, 数米距离的量子微波互联分布式量子计算
可扩展二维量子PIC	S2QUIP	Kungliga, 瑞典	小型通用化光源和集成光子电路, 为量子通信提供信息载体
可扩展稀土离子量子计算	SQUARE	KIT, 德国	基于稀土离子材料的量子物理比特高密度集成和光学互联

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 1 欧盟“量子宣言”旗舰计划首批科研项目

欧盟 2016 年推出为期十年，总投资额超过 10 亿欧元的“量子宣言”旗舰计划，并于 2018 年 10 月启动首批 19 个科研类项目，如图 1 所示。2019 年 7 月欧盟 10 国签署量子通信基础设施（QCI）声明，探讨未来十年在欧洲范围内将量子技术和系统整合到传统通信基础设施之中，以保护智能能源网络、空中交通管制、银行和医疗保健设施等加密通信系统免受网络安全威胁。

美国 2018 年 12 月通过《国家量子行动计划（NQI）》立法，计划在未来四年增加量子信息科学领域投资 12.75 亿美元，以确保美国在量子技术时代的科技领导力，以及经济安全、信息安全和国家安全。同期发布的《量子信息科学国家战略概述》，规划推动量子计算超大规模数据集优化处理，量子模拟新材料设计和分子功能研究，基于量



子隐形传态的安全通信以及量子传感与精密测量等领域的研究，同时设立 3~6 个量子创新实验室（QILabs），建立全美量子科研网络（QRNet），推动量子计算接入计划（QCAP）。

我国对量子信息技术发展与应用高度重视。2018 年 5 月，习近平总书记在两院院士大会上的讲话中指出，“以人工智能、量子信息、移动通信、物联网、区块链为代表的新一代信息技术加速突破应用。”国务院发布《“十三五”国家科技创新规划》，《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》和《“十三五”国家信息化规划》等文件，指导量子信息技术研究与应用。科技部和中科院通过自然科学基金、重点研发计划和战略先导专项等项目对量子信息科研给予支持，同时论证筹备重大科技项目和国家实验室，进一步推动基础理论与实验研究。发改委牵头组织实施量子保密通信“京沪干线”技术验证与应用示范项目，国家广域量子保密通信骨干网络建设一期工程等试点应用项目和网络建设。工信部开展量子保密通信应用评估与产业研究，大力支持和引导量子信息技术国际与国内标准化研究。

### （三）量子信息技术标准化研究受到重视并加速发展

近年来，全球范围内量子信息技术领域的样机研究、试点应用和产业化迅速发展，随着量子计算、量子通信和量子测量等领域新兴应用的演进，在术语定义、性能评价、系统模块、接口协议、网络架构和管理运维等方面的标准化需求也开始逐渐出现。

国际标准化组织纷纷成立量子信息技术相关研究组和标准项目并开展工作，2018 年以来相关布局与研究工作的明显提速。欧洲多国

在完成 QKD 现网实验之后，欧洲电信标准化协会（ETSI）成立 ISG-QKD 标准组，已发布包括术语定义、系统器件、应用接口、安全证明、部署参数等 9 项技术规范，另有 3 项在研。国际标准化组织和国际电工委员会的第一联合技术委员会（ISO/IEC JTC1）成立了有我国专家参与的量子计算研究组（SG2）和咨询组（AG），发布量子计算研究报告和技术趋势报告，同时在信息安全分技术委员会（SC27）立项由我国专家牵头的 QKD 安全需求与测评方法标准项目。国际电气和电子工程师协会（IEEE）启动了量子技术术语定义、量子计算性能指标和软件定义量子通信协议等 3 个研究项目。国际互联网工程任务组（IETF）成立量子互联网研究组（QIRG）开展量子互联网路由、资源分配、连接建立、互操作和安全性等方面的初步研究。

国际电信联盟电信标准化部门（ITU-T）对量子信息技术发展演进及其未来对信息通信网络与产业的影响保持高度关注。未来网络研究组（SG13）已开展 QKD 网络的基本框架、功能架构、密钥管理和软件定义控制等方面研究项目，网络安全研究组（SG17）则在 QKD 网络安全要求、密钥管理安全要求、可信节点安全要求、加密功能要求等方面开展研究，我国部门成员和学术成员担任部分标准编辑人并做出重要技术贡献。此外，我国还推动在 ITU-T 成立面向网络的量子信息技术研究焦点组（FG-QIT4N），全面开展量子信息技术标准化研究工作。2019 年 6 月，在上海成功举办了首届 ITU 量子信息技术国际研讨会，广泛邀请全球研究机构和科技公司的专家学者，对量子计算、量子通信、量子测量、量子信息网络（QIN）等议题开展交流和

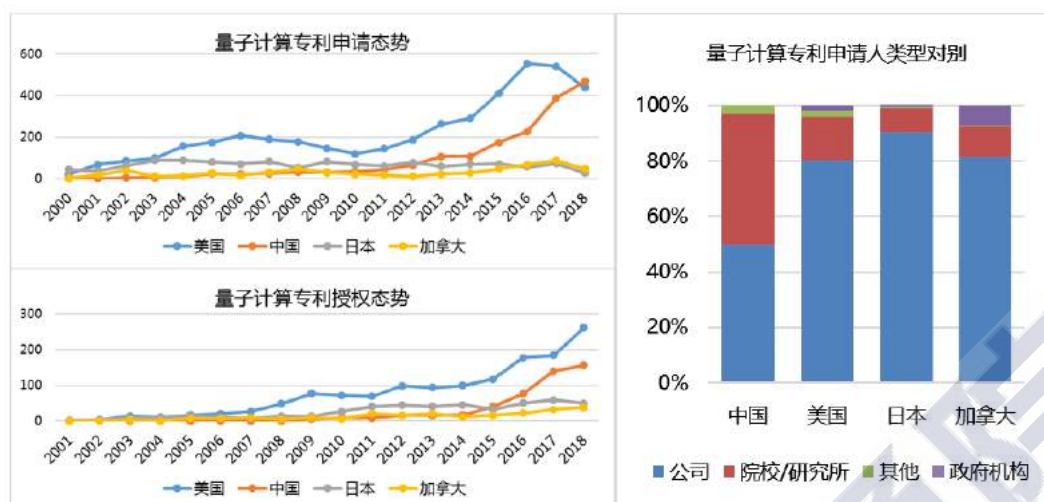
讨论。2019 年 9 月，FG-QIT4N 在电信标准化顾问组（TSAG）全会期间正式成立，由中俄美专家共同担任主席，计划在焦点组研究期内，对 QKD 网络和 QIN 等相关议题开展标准化预研，为 ITU-T 下一个研究期的量子信息技术标准研究工作奠定基础并提出建议。

我国在量子保密通信网络建设和试点应用方面具备较好的研究基础和实践积累，相关标准化研究工作也逐步开展。2017 年，中国通信标准化协会（CCSA）成立量子通信与信息技术特设任务组（ST7），开展量子通信和网络以及量子信息技术关键器件的标准研究，目前已完成 6 项研究报告，并开展量子保密通信术语定义和应用场景，QKD 系统技术要求、测试方法和应用接口等国家标准和行业标准的制定。QKD 技术还涉及密码的产生、管理和使用，中国密码行业标准化技术委员会（CSTC）也开展了 QKD 技术规范 and 测评体系等密码行业标准的研究。2019 年 1 月，量子计算与测量标准化技术委员会（TC578）正式成立，计划开展量子计算和量子测量领域的标准化研究工作。

#### **（四）量子信息技术创新活跃，论文和专利增长迅速**

##### **1. 量子计算近年来论文和专利增长迅速**

自上世纪 90 年代开始，各科技强国开始在量子技术领域加大投入，量子计算专利申请开始出现。近年来，量子计算领域的专利申请和授权发展态势情况如图 2 所示，2012 年之前全球量子计算领域专利申请数量整体保持平稳，专利申请主要来自美国和日本。



注：专利申请的公开存在滞后性，2019 年数据未计入，后同。

来源：中国信息通信研究院知识产权中心（检索时间 2019.10）

图 2 量子计算领域专利申请及授权情况

2012 年开始，随着欧美科技巨头开始大力投入和持续推动，以及全球各国科技企业和研究机构之间的相互竞争，更加重视量子计算领域的知识产权布局，专利申请数量出现明显增长。美国在布局时间和申请总量上占有优势，近年来我国量子计算领域专利申请数量的增长趋势更快。通过对比中、美、日、加的专利申请人的类型可以看出，我国专利更多的来自高校和科研机构，国内科技企业多与科研院所合作，相关研究工作和知识产权布局大多处于起步阶段。

近 20 年来全球量子计算领域研究论文发表趋势和主要发文机构统计如图 3 所示，随着量子计算从理论走向物理实现，全球论文发表量也保持增长态势，特别是在 2018-19 年研究论文数量激增。从发表论文研究机构来看，近五年来排名前 20 的机构中，中国占据 3 席，分别是中国科学院、中国科学技术大学和清华大学。其中，中国科学院的发文量持续快速上升，过去一年的新增论文数量仅次于美国 MIT 和荷兰 TU Delft。美国量子计算研究重要机构多达 10 个，除了高校



外，IBM、Microsoft 和 Google 等科技巨头也有较多研究成果发表。此外，德国 ETH Zurich、Max Planck Society、加拿大 Waterloo 大学、蒙特利尔大学、日本东京大学也是重要的创新主体。

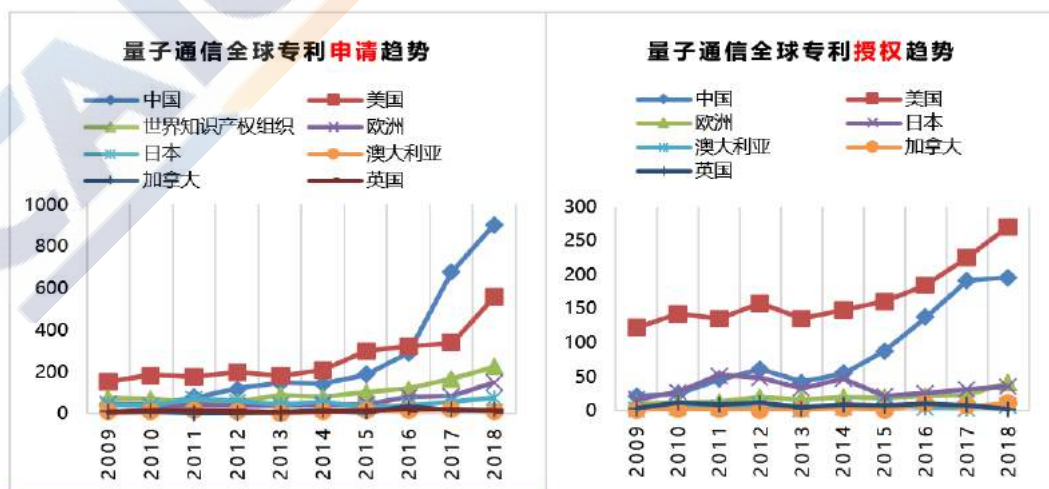


来源：中国信息通信研究院知识产权中心（Microsoft Academic 检索时间 2019.10）

图 3 量子计算领域发表论文趋势及主要发文机构

## 2.量子通信领域中美两国专利数量领先

随着美、欧、英、日、韩等国的量子通信研发及试点应用的发展，专利作为重要的技术保护手段受到产学研界的重视，相关专利快速增长，量子通信领域全球专利申请和专利授权发展趋势如图 4 所示。



来源：中国信息通信研究院知识产权中心（检索时间 2019.10）

图 4 量子通信领域专利申请和专利授权发展趋势



美国和日本在量子通信领域的早期专利申请量较多，但近年来，专利申请地域向中国转移。对比专利申请和专利授权来看，由于早期中国专利申请量较少，所以目前看中国授权专利数量少于美国，但是随着我国在量子通信基础研究和应用探索的不断深入，以及量子保密通信产业的发展，预计未来专利授权量还将继续上升，而且也将吸引更多的外国公司来华布局专利。



来源：中国信息通信研究院知识产权中心（Microsoft Academic 检索时间 2019.10）

图 5 量子通信领域论文发表趋势及主要发文机构

2005 年之后，量子密钥分发（QKD）技术研究从理论探索开始走向实用化，相关研究论文数量持续上升，近年 QKD 领域论文发表趋势和主要发文机构如图 5 所示。其中，QKD 领域 70% 的研究论文在近十年发表，文献引证数量也在不断增加，2018 年发文量创新高。中、美、加、德、新、英等国以科研机构为主，日本则主要来自企业。我国中科大、北邮、清华、中科院、上交等院校的科研论文数量排名前列。相比之下，量子隐形传态（QT）的论文数量在 2005 年之前一直高于 QKD，但近年来论文数量保持平稳并呈下降趋势，与其关键

技术瓶颈仍未取得突破有一定关系。除欧、美、日科研机构外，我国的中科大、中科院、电子科大和清华的论文发表数量也名列前茅。

### 3.量子测量和量子计量的专利论文增长

与量子计算和量子通信相比，量子测量和量子计量领域的专利申请和学术论文总量偏少，近年也呈现增长趋势，如图 6 所示。



来源：中国信息通信研究院知识产权中心（Microsoft Academic 检索时间 2019.10）

图 6 量子测量领域专利申请和论文发表趋势

截至 2019 年 10 月公开的相关专利近千件，并且增长趋势强劲，从专利申请地域来看，美、中、日的专利申请量较多。论文方面，与量子计量（Quantum metrology）相关的论文数量持续上升，美国加州理工学院、德国苏黎世联邦理工学院以及澳大利亚的高校和科研机构发表了较多的论文。我国的中科大、中科院和北航等单位在量子精密测量领域持续开展科研攻关，开始步入量子测量和量子计量研究论文发表数量的国际前沿行列。

## 二、量子计算领域研究与应用进展

### （一）物理平台探索发展迅速，技术路线仍未收敛

量子计算研究始于上世纪八十年代，经历了由科研机构主导的基础理论探索和编码算法研究阶段，目前已进入由产业和学术界共同合作的工程实验验证和原理样机攻关阶段。量子计算包含量子处理器、量子编码、量子算法、量子软件、以及外围保障和上层应用等多个环节。其中，量子处理器是制备和操控量子物理比特的平台，量子编码是基于众多物理比特实现可容错逻辑比特的纠错编码，量子算法和软件是将计算困难问题与量子计算并行处理能力结合的映射和桥梁。目前，量子处理器的物理比特实现仍是量子计算研究的核心瓶颈，主要包含超导、离子阱、硅量子点、中性原子、光量子、金刚石色心和拓扑等多种方案，研究取得一定进展，但仍未实现技术路线收敛。

超导路线方面，Google 在 2018 年推出 72 位量子比特处理器，Rigetti 正在构建更强大的 128 量子比特处理器。我国中科大在 2019 年已实现 24 位超导量子比特处理器，并进行多体量子系统模拟；同时，清华大学利用单量子比特实现了精度为 98.8% 的量子生成对抗网络，未来可应用于图像生成等领域。量子比特间的纠缠或连接程度是影响量子计算处理能力的重要因素之一，目前报道的处理器结构设计和量子比特纠缠程度不尽统一，大部分并未实现全局纠缠。离子阱路线方面，IonQ 已实现 79 位处理量子比特和 160 位存储量子比特。光量子路线方面，中科大已实现 18 位光量子纠缠操控，处于国际领先地位。硅量子点路线方面，新南威尔士大学报道了保真度为 99.96%

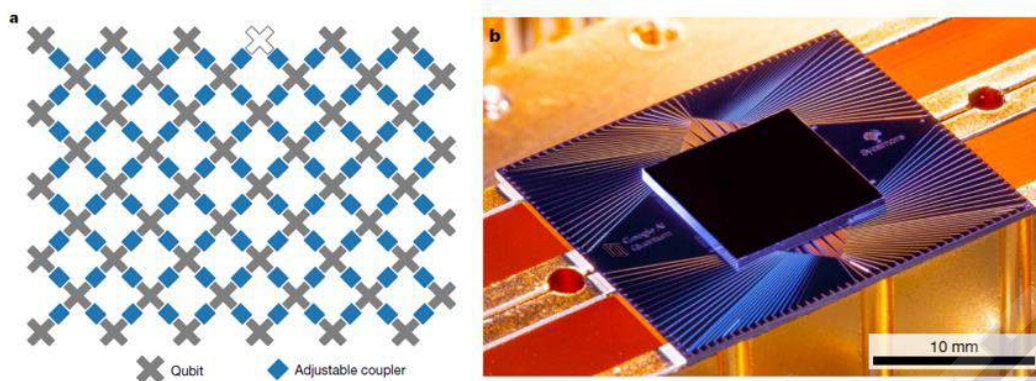


的单比特逻辑门和保真度为 98% 的双比特逻辑门，中科大也实现了高保真的单比特逻辑门。此外，我国本源量子研发了适用于 20 位量子比特的量子测控一体机，用于提供量子处理器芯片运行所需要的关键信号，实现量子芯片操控。

目前，量子计算物理平台中的超导和离子阱路线相对领先，但尚无任何一种路线能够完全满足量子计算技术实用化的 DiVincenzo 条件，包括：（1）可定义量子比特，（2）量子比特有足够的相干时间，（3）量子比特可以初始化，（4）可以实现通用的量子门集合，（5）量子比特可以被读出。为充分利用每种技术的优势，未来的量子计算机也可能是多种路线并存的混合体系。

## （二）“量子优越性”突破里程碑，实用化尚有距离

量子优越性（Quantum Supremacy，也译作“量子霸权”）的概念由 MIT 的 John Preskill 教授首先提出，指量子计算在解决特定计算困难问题时，相比于经典计算机可实现指数量级的运算处理加速，从而体现量子计算原理性优势。其中，特定计算困难问题是指该问题的计算处理，能够充分适配量子计算基于量子比特的叠加特性和量子比特间的纠缠演化特性而提供的并行处理能力，从而发挥出量子计算方法相比于传统计算方法在解决该问题时的显著算力优势。



来源：Nature, 2019. 574(7779): p. 505-510.

图 7 Google Sycamore 超导量子计算处理器

2019 年 10 月,《自然》杂志以封面论文形式报道了 Google 公司基于可编程超导处理器 Sycamore, 如图 7 所示, 实现量子优越性的重要研究成果。该处理器采用倒装焊封装技术和可调量子耦合器等先进工艺和架构设计, 实现了 53 位量子物理比特二维阵列的纠缠与可控耦合, 在解决随机量子线路采样问题时, 具有远超过现有超级计算机的处理能力。Google 研究成果是证明量子计算原理优势和技术潜力的首个实际案例, 具有里程碑意义。这一热点事件所引发的震动和关注, 将进一步推动全球各国在量子计算领域的研发投入、工程实践和应用探索, 为加快量子计算机的研制和实用化注入新动力。

需要指出的是, 现阶段量子计算的研究发展水平距离实用化仍有较大差距。量子计算系统非常脆弱, 极易受到材料杂质、环境温度和噪声等外界因素影响而引发退相干效应, 使计算准确性受到影响, 甚至计算能力遭到破坏。发展速度最快的超导技术路线, 在可扩展性、操控时间和保真度等方面也存在局限。此外, 可编程通用量子计算机需要大量满足容错阈值的物理量子比特进行纠错处理, 克服退相干效应影响, 获得可用的逻辑量子比特。以运行 Shor 算法破译密码为例,

要攻破 AES 加密算法需要数千个量子逻辑比特，转换为量子物理比特可能需要数万个或者更多。现有研究报道中的物理量子比特数量和容错能力与实际需求尚有很大差距，量子逻辑比特仍未实现。通用量子计算机的实用化，业界普遍预计仍需十年以上时间。

在达到通用量子计算所需的量子比特数量、量子容错能力和工程化条件等要求之前，专用量子计算机或量子模拟器将成为量子计算发展的下一个重要目标。结合量子计算和量子模拟应用算法等方面研究，在量子体系模拟、分子结构解析、大数据集优化和机器学习算法加速等领域开发能够发挥量子计算处理能力优势的“杀手级应用”，将为量子计算技术打开实用化之门。

### （三）量子计算云平台成为热点，发展方兴未艾

量子处理器需要在苛刻的环境下进行运算和储存，通过云服务进行量子处理器的接入和量子计算应用推广成为量子计算算法及应用研究的主要形式之一。用户在本机编写量子线路和代码，将待执行的量子程序提交给远程调度服务器，调度服务器安排用户任务按照次序传递给后端量子处理器，量子处理器完成任务后将计算结果返回给调度服务器，调度服务器再将计算结果变成可视化的统计分析发送给用户，完成整个计算过程。近年来，越来越多的量子计算公司和研究机构发布量子计算云平台，以实现对量子处理器资源的充分共享，并提供各种基于量子计算的衍生服务。





来源：中国信息通信研究院

图 8 量子计算云平台通用体系架构

量子计算云平台的通用体系架构如图 8 所示，主要包括计算引擎层、基础开发层、通用开发层、应用组件层和应用服务层。量子计算云平台的服务模式主要分为三种：一是量子基础设施服务（q-IaaS），即提供量子计算云服务器、量子模拟器和真实量子处理器等计算及存储类基础资源；二是量子计算平台服务（q-PaaS），即提供量子计算和量子机器学习算法的软件开发平台，包括量子门电路、量子汇编、量子开发套件、量子算法库、量子加速引擎等；三是量子应用服务（q-SaaS），即根据具体行业的应用场景和需求设计量子机器学习算法，提供量子加速版本的 AI 应用服务，如生物制药、分子化学和交通治理等。目前，量子计算云平台以 q-PaaS 模式为主，提供量子模拟器、计算工具和开发套件等软件服务。随着量子计算物理平台与云基础设施的深度结合，以及量子处理器功能和性能的不断发展，q-IaaS 模式比重将逐步增多。未来，随着量子计算产业进一步发展成熟、生态逐步开放，将有更多的行业和企业尝试通过 q-SaaS 模式对其业务处理进行赋能。

美国量子计算云平台布局较早，发展迅速。IBM 已推出 20 位置量

量子比特的量子云服务，提供 QiKit 量子程序开发套件，建立了较为完善的开源社区。Google 开发了 Cirq 量子开源框架和 OpenFermion-Cirq 量子计算应用案例，可搭建量子变分算法（Variational Algorithms），模拟分子或者复杂材料的相关特性。Rigetti 推出的量子计算云平台以混合量子+经典的方法开发量子计算运行环境，使用 19 位量子比特超导芯片进行无监督机器学习训练及推理演示，提供支持多种操作系统的 Forest SDK 量子软件开发环境。

我国量子计算云平台起步较晚，目前发展态势良好，与国际先进水平相比在量子处理器、量子计算软件方面的差距逐步缩小。中科大与阿里云共同推出 11 位超导量子计算云接入服务。华为发布 HiQ 量子计算模拟云服务平台，可模拟全振幅的 42 位量子比特，单振幅的 81 位量子比特，并开发兼容 ProjectQ 的量子编程框架。本源量子推出的量子计算云平台可提供 64 位量子比特模拟器和基于半导体及超导的真实量子处理器，提供 Qrunes 编程指令集，Qpanda SDK 开发套件，推出移动端与桌面端应用程序，兼具科普、教学和编程等功能，为我国量子计算的研究和应用推广提供了有益探索。

#### （四）产业发展格局正在形成、生态链不断壮大

在量子计算领域，美国近年来持续大力投入，已形成政府、科研机构、产业和投资力量多方协同的良好局面，如图 9 所示，并建立了在技术研究、样机研制和应用探索等方面的全面领先优势。





来源：中国信息通信研究院

图 9 美国量子计算研究与应用发展模式

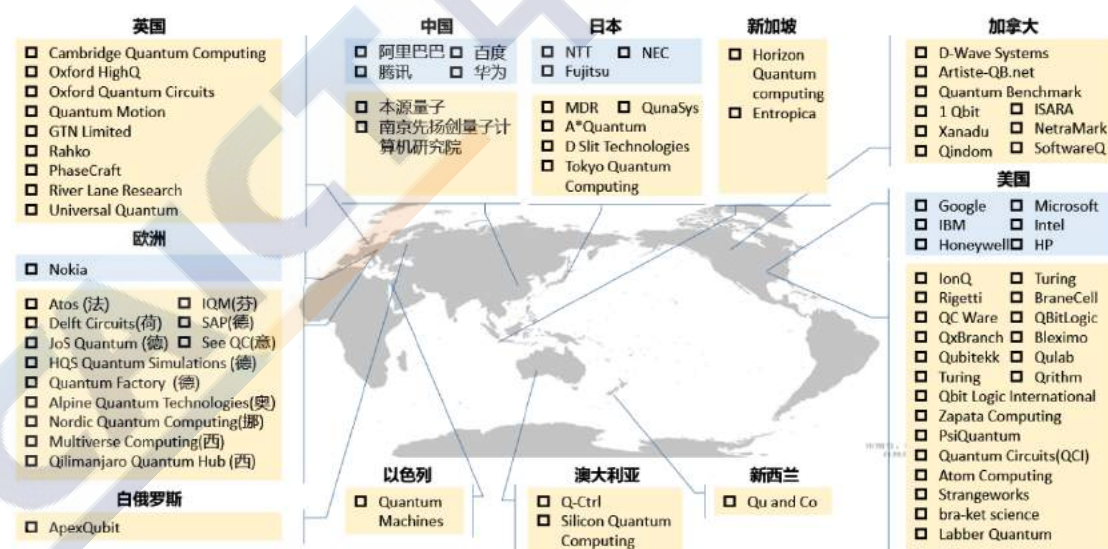
英、欧、日、澳等国紧密跟随，领先国家之间通过联合攻关和成果共享，正在形成并不断强化联盟优势。我国近年来取得系列研究成果，但与美国相比仍有一定差距。此外，印度、韩国、俄罗斯、以色列等国也开始将量子计算技术列入国家技术计划加大投入。

科技巨头间的激烈竞争，推动量子计算技术加速发展。Google、IBM、英特尔、微软在量子计算领域布局多年，霍尼韦尔随后加入，产业巨头基于雄厚的资金投入、工程实现和软件控制能力积极开发原型产品、展开激烈竞争，对量子计算成果转化和加速发展助力明显。Google 在 2018 年实现 72 位超导量子比特，在 2019 年证明量子计算优越性。IBM 在 2019 年 1 月展示具有 20 位量子比特的超导量子计算机，并在 9 月将量子比特数量更新为 53 位。微软在 2019 年推出量子计算云服务 Azure Quantum，可以与多种类型的硬件配合使用。霍尼韦尔的离子阱量子比特装置已进入测试阶段。

我国阿里巴巴、腾讯、百度和华为近年来通过与科研机构合作或聘请具有国际知名度的科学家成立量子实验室，在量子计算云平台、

量子软件及应用开发等领域进行布局。阿里与中科大联合发布量子计算云平台并在 2018 年推出量子模拟器“太章”。腾讯在量子 AI、药物研发和科学计算平台等应用领域展开研发。百度在 2018 年成立量子计算研究所，开展量子计算软件和信息技术应用等业务研究。华为在 2018 年发布 HiQ 量子云平台，并在 2019 年推出昆仑量子计算模拟一体原型机。我国科技企业进入量子计算领域相对较晚，在样机研制及应用推动方面与美国存在较大差距。

初创企业是量子计算技术产业发展的另一主要推动力量。初创企业大多脱胎于科研机构或科技公司，近年来，来自政府、产业巨头和投资机构的创业资本大幅增加，初创企业快速发展。目前，全球有超过百余家初创企业，涵盖软硬件、基础配套及上层应用各环节，如图 10 所示，企业集聚度以北美和欧洲（含英国）最高。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 10 量子计算领域科技公司和初创企业分布

尽管量子计算目前仍处于产业发展的初期阶段，但军工、气象、金融、石油化工、材料科学、生物医学、航空航天、汽车交通、图像

识别和咨询等众多行业已注意到其巨大的发展潜力，开始与科技公司合作探索潜在用途，生态链不断壮大，如图 11 所示。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 11 量子计算研发主体与产业应用生态

在量子计算研究和应用发展的同时，其产业基础配套也在不断完善。2019 年英特尔与 Bluefors 和 Afore 合作推出量子低温晶圆探针测试工具，加速硅量子比特测试过程。本源量子创立本源量子计算产业联盟，2019 年携手中船鹏力共建量子计算低温平台。

## （五）应用探索持续深入，“杀手级应用”或可期待

当前阶段，量子计算的主要应用目标是解决大规模数据优化处理和特定计算困难问题（NP）。机器学习在过去十几年里不断发展，对计算能力提出巨大需求，结合了量子计算高并行性的新型机器学习算法可实现对传统算法的加速优化，是目前的研究热点。量子机器学习算法主要包括异质学习（HHL）算法、量子主成分分析（qPCA）、量子支持向量机（qSVM）和量子深度学习等。目前，量子机器学习算法在计算加速效果方面取得一定进展，理论上已证明量子算法对部分



经典计算问题具有提速效果，但处理器物理实现能力有限，算法大多只通过模拟验证，并未在真实系统中进行迭代，仍处发展初期。

目前，基于量子退火和其他数据处理算法的专用量子计算机，已经展开系列应用探索。Google 联合多家研究机构将量子退火技术应用于图像处理、蛋白质折叠、交通流量优化、空中交通管制、海啸疏散等领域。JSR 和三星尝试使用量子计算研发新材料特性。埃森哲、Biogen 和 1Qbit 联合开发量子化分子比较应用，改善分子设计加速药物研究。德国 HQS 开发的算法可以在量子计算机和经典计算机上有效地模拟化学过程。摩根大通、巴克莱希望通过蒙特卡洛模拟加速来优化投资组合，以提高量化交易和基金管理策略的调整能力，优化资产定价及风险对冲。量子计算应用探索正持续深入，未来 3-5 年有望基于量子模拟和嘈杂中型量子计算（NISQ）原型机在生物医疗、分子模拟、大数据集优化、量化投资等领域率先实现应用。

### 三、量子通信领域研究与应用进展

#### （一）量子通信技术研究和样机研制取得新成果

量子通信主要分量子隐形传态（Quantum Teleportation，简称 QT）和量子密钥分发（Quantum Key Distribution，简称 QKD）两类。QT 基于通信双方的光子纠缠对分发（信道建立）、贝尔态测量（信息调制）和幺正变换（信息解调）实现量子态信息直接传输，其中量子态信息解调需要借助传统通信辅助才能完成。QKD 通过对单光子或光场正则分量的量子态制备、传输和测量，首先在收发双方间实现无法

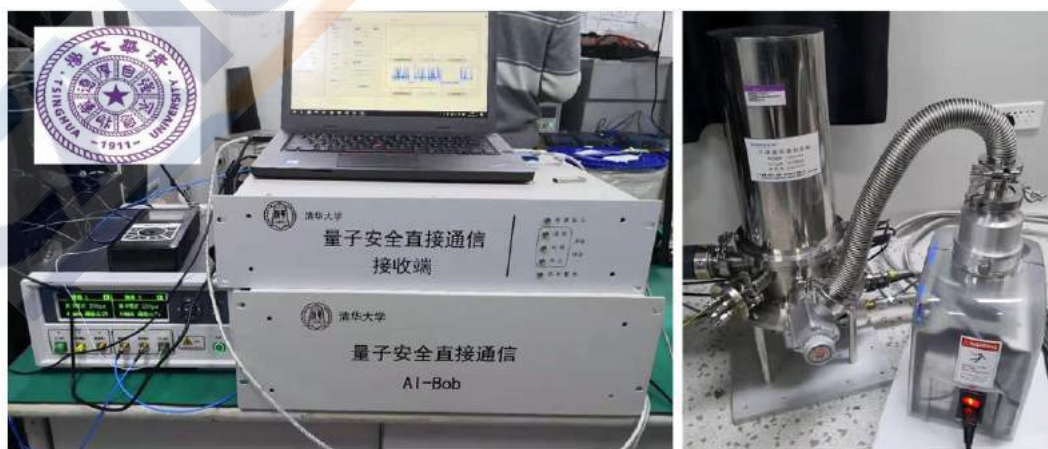
被窃听的安全密钥共享，再与传统加密技术相结合完成经典信息加密和安全传输，基于 QKD 的保密通信称为量子保密通信。

近年来，QT 研究在空、天、地等平台积极开展实验探索。2017 年，中科大基于“墨子号”量子科学实验卫星，实现星地之间 QT 传输，低轨卫星与地面站采用上行链路实现量子态信息传输，最远传输距离达到 1400 公里，成为目前 QT 自由空间传输距离的最远记录。2018 年，欧盟量子旗舰计划成立量子互联网联盟（QIA），由 Delft 技术大学牵头，采用囚禁离子和光子波长转换技术探索实现量子隐形传态和量子存储中继，计划在荷兰四城市之间建立全球首个光纤 QT 实验网络，基于纠缠交换实现量子态信息的直接传输和多点组网。2019 年，南京大学报道基于无人机开展空地量子纠缠分发和测量实验，无人机携带光学发射机载荷，完成与地面接收站点之间 200 米距离的量子纠缠分发测量。目前，QT 研究仍主要局限在各种平台和环境条件下的实验探索，包括高品质纠缠制备、量子态存储中继和高效率量子态检测等关键技术瓶颈尚未突破，距离实用化仍有较大距离。

近年来，QKD 的实验研究不断突破传输距离和密钥成码率的记录。2018 年，东芝欧研所报道了新型相位随机化双光场编码和传输实验，实现 550 公里超低损耗光纤传输距离记录，其中的双光场中心测量节点可以作为量子中继的一种替代方案。中科大和奥地利科学院联合报道了基于“墨子号”卫星实现 7600 公里距离的洲际 QKD 和量子保密通信，在可用时间窗口内，基于卫星中继的密钥传输平均速率 ~3kbps，在两地 QKD 密钥累积一定数量之后，可以用于进行图片和

视频会议等应用的加密传输。日内瓦大学报道了采用极低暗记数的超导纳米线单光子探测器的 QKD 传输实验，创造了 421 公里的单跨段光纤传输最远距离，对应密钥成码率 0.25bit/s，在 250 公里光纤传输距离对应密钥成码率为 5kbit/s。东芝欧研所也报道基于 T12 改进型 QKD 协议和 LDPC 纠错编码的 QKD 系统实验，在 10 公里光纤信道连续运行 4 天，平均密钥成码率达到 13.72Mbps。QKD 实验研究进一步提升系统性能和传输能力，为应用推广奠定基础。

在量子通信领域，还有量子安全直接通信（Quantum Secure Direct Communication，简称 QSDC）技术方向也值得关注。QSDC 系统中信息接收端为 Bob，信息发射端为 Alice。Bob 端脉冲光源经过衰减器和随机信号控制相位调制后，输出单光子量子态信号，在 Alice 端随机抽样检测一部分量子态信号，对剩余的量子态信号用两种不同么正变换编码，发送经典信息，并通过原信道以时分复用方式反向回传到 Bob 端，Bob 端根据接收到的单光子量子态与初始制备态的差异性检测，解调出 Alice 的编码信息。



来源：清华大学物理系

图 12 量子安全直接通信原理样机实验系统

2019 年，清华大学物理系基于首创的 QSDC 理论和实验方案，



实现了原理实验样机研制，如图 12 所示，并完成实验室光纤环境中基于 QSDC 的信息直接传输演示实验。实验室环境 10 公里光纤信道传输文件的信息传输平均速率约为 4.69 kbit/s。QSDC 的技术结合了 QKD 和 QT 的部分技术思想，以及信道安全容量分析等信息论方法，能够基于量子物理学和信息论同步实现经典信道安全状态监测和信息加密传输。目前实验样机系统的信息传输速率较为有限，需使用低温制冷超导探测器，实用化和工程化水平仍有较大提升空间。

## （二）量子密钥分发技术演进关注提升实用化水平

随着 QKD 技术进入实用化阶段，并不断开展试点应用和网络建设，进一步提升其实用化和商用化水平成为科研机构 and 产业链上下游关注和技术演进的主要方向。QKD 实用化技术和应用演进的主要方向包括基于光子集成（PIC）技术提升收发机的集成度，采用连续变量（CV）QKD 技术开展实验和商用设备开发，以及开展 QKD 与现有光通信网络的共纤传输和融合组网等方面的研究与探索。

QKD 技术的商用化需要在设备集成度，系统可靠性，解决方案性价比和标准化程度等方面进行提升。通过与 PIC 和硅光等新型技术进行融合，可以进一步实现 QKD 设备光学组件的小型化和集成化，同时提升系统的功能性能和可靠性，目前已经成为研究机构和产业链上下游关注的焦点之一。英国 Bristol 大学已报道了基于 InP 和 SiON 等材料的 PIC 技术方案，可以实现 QKD 设备量子态信号调制器和解调器的芯片化集成，支持多种编码调制方案，可一定程度提高 QKD 系统工程化水平，但目前脉冲光源和单光子探测器（SPD）模块仍难

以实现集成。我国深圳海思半导体有限公司和山东国讯量子芯科技有限公司等，在 QKD 调制解调芯片化领域也进行了研究布局。

CV-QKD 中的高斯调制相干态（GG02）协议应用广泛，系统采用与经典光通信相同的相干激光器和平衡零差探测器，具有集成度与成本方面的优势，量子态信号检测效率可达 80%，便于和现有光通信系统及网络进行融合部署。主要局限是协议后处理算法复杂度高，长距离高损耗信道下的密钥成码率较低，并且协议安全性证明仍有待进一步完善。CV-QKD 具有低成本实现城域安全密钥分发的潜力，应用部署难度小，产业链成熟度高，未来可能成为 QKD 规模应用可行解决方案。2019 年，北大和北邮报道了在西安和广州现网 30 公里和 50 公里光纤，采用线路噪声自适应调节和发射机本振共纤传输方案，实现 5.91kbit/s 和 5.77kbit/s 的密钥成码率，为 CV-QKD 现网实验的新成果，并在青岛开展现网示范应用。

QKD 商用化系统在网络建设和部署过程中，由于量子态光信号的极低光功率，以及单光子探测器的超高检测灵敏度，所以通常需要独立的暗光纤进行传输，而与其他光通信信号进行共纤混合传输，可能导致光纤内产生的拉曼散射噪声影响单光子检测事件响应的正确率。QKD 系统与光通信系统的共纤混传能力是限制现网部署的一个关键性因素，也是未来发展演进的重要研究方向之一。目前，已有中科大，东芝欧研所，中国电信和中国联通等报道了基于 1310nm 的 O 波段 DV-QKD 系统与 1550nm 的 C 波段光通信系统的共纤混传实验和现网测试，但 QKD 系统的密钥成码率对光纤的损耗敏感，在实际



应用部署中并不推荐使用 O 波段，并且 1310nm 的 QKD 系统商用化程度较低。商用 QKD 系统通常采用 1550nm 的 C 波段作为量子态光信号波长，与 1310nm 的 O 波段光通信设备的共纤混传，也在部分运营商进行了相关测试。在限制光通信信号功率至接收机灵敏度范围的条件下，可以支持 QKD 在约 50 公里的城域范围内共纤传输和融合部署，并且密钥成码率与独占光纤传输条件仍基本保持相同量级。未来，在含有光放大器的商用光通信系统中，进行 QKD 系统的融合组网和共纤传输，仍然是重要研究方向，在共纤传输方面，CV-QKD 采用本振光相干探测和平衡接收，对于拉曼散射噪声具有较强的容忍度，相比 DV-QKD 具有一定原理性优势。

### （三）量子保密通信应用探索和产业化进一步发展

基于 QKD 的量子保密通信在全球范围内进一步开展了试点应用和网络建设，欧盟“量子旗舰计划”项目支持西班牙和法国等地运营商，开展 QKD 实验网络建设，与科研项目结合进行商业化应用探索。韩国 SKT 等运营商通过收购瑞士 IDQ 股权等方式，也开始介入 QKD 技术领域，并承建了韩国首尔地区的 QKD 实验网络。

我国量子保密通信的网络建设和示范应用发展较为迅速，近年来中科大潘建伟院士团队及其产业公司开展了“京沪干线”和国家广域量子保密通信骨干网络建设一期工程等 QKD 网络建设项目。中国科大郭光灿院士团队联合相关企业建设了从合肥到芜湖的“合巢芜城际量子密码通信网络”，以及从南京到苏州总长近 600 公里的“宁苏量子干线”；华南师大刘颂豪院士团队和清华大学龙桂鲁教授团队联合启

动建设覆盖粤港澳大湾区的“广佛肇量子安全通信网络”。我国的 QKD 网络建设和示范应用项目的数量和规模已处于世界领先。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 13 我国 QKD 领域主要研究机构和设备商

在产业链发展方面，近年来我国又新增了一批由科研机构转化或海外归国人才创立的 QKD 设备供应商，并且在技术路线上呈现多元化发展态势，QKD 技术研究机构和设备供应商情况如图 13 所示。CV-QKD 技术在北大、北邮、上海交大和山西大学等高校和研究机构中取得大量研究成果。上海循态量子、北京启科量子、北京中创为量子 and 广东国腾量子等公司加入 QKD 设备供应商行列，同时传统通信设备行业中的华为和烽火等设备供应商，也开始关注基于 CV-QKD 等技术的商用化设备，并与传统通信设备和系统进行整合，探索为信息网络中的加密通信和安全增值服务提供解决方案。

基于 QKD 的量子保密通信目前主要用于点到点的密钥共享和基于 VPN 和路由器等有线网络的信息传输加密。探索将 QKD 与无线通信加密应用场景结合，对于扩展量子保密通信的应用场景，开拓商业化应用市场，以及推动产业化发展具有重要价值。其中的主要难点

是量子密钥一旦生成之后，就不再具有由量子物理特性保证的安全性，所以密钥本身不能再通过通信网络进行二次传输。通过使用 QKD 网络作为密钥分发基础设施，在不同 QKD 网络节点的安全管理域内，使用密钥充注设备可以为符合一定安全性等级要求的移动存储介质，例如 SD 卡等，进行密钥充注。密钥存储介质再与具备身份认证和加密通信功能的无线终端进行融合，可以实现使用量子密钥对无线终端与加密服务器之间的身份认证和会话密钥协商过程的加密保护，从而为无线通信领域的加密应用提供一定程度的量子加密服务。目前该解决方案已有初步商用化设备，并开始探索在政务和专网等高安全性需求领域的无线加密通信应用，未来可能成为扩展量子保密通信商业化应用的一个重要方向。

#### （四）量子保密通信网络现实安全性成为讨论热点

在量子保密通信试点应用和网络建设发展的同时，量子保密通信系统和网络的现实安全性也是学术界、产业界和社会舆论关注的问题之一。近来，中科大郭光灿院士团队<sup>1</sup>和上海交大金贤敏教授团队<sup>2</sup>发表的关于 QKD 系统现实安全性的研究论文，进一步引发了关于量子保密通信系统和网络现实安全性的讨论。

QKD 技术经过近 40 年的发展，其中密钥分发的安全性由量子力学的基本原理保证，理论安全性证明也相对完备，QKD 技术在提供对称密钥的安全性方面的价值已经获得全球学术界和产业界的承认

<sup>1</sup> Qian, Y.-J., et al., Hacking the Quantum Key Distribution System by Exploiting the Avalanche-Transition Region of Single-Photon Detectors. *Physical Review Applied*, 2018. 10(6): p. 064062.

<sup>2</sup>Pang, X.-L., et al., Hacking Quantum Key Distribution via Injection Locking. *arXiv:1902.10423v2*.



和共识，但基于 QKD 的量子保密通信系统和网络的现实安全性仍然是值得关注和研究的问题。

QKD 只是量子保密通信系统的一个环节，量子保密通信系统整体满足信息论可证明安全性需要 QKD、一次一密加密和安全身份认证三个环节，缺一不可。目前 QKD 商用系统在现网光纤中的密钥生成速率约为数十 kbit/s 量级，对于现有信息通信网络中的 SDH、OTN 和以太网等高速业务，难以采用一次一密加密，通常与传统对称加密算法（例如 AES、SM1 和 SM4 加密算法）相结合，由 QKD 提供对称加密密钥。在此情况下，由于存在密钥的重复使用，并不满足一次一密的加密体制要求。需要指出的是，相比传统对称加密体系，量子保密通信仍然能够带来安全性提升和应用价值，一方面相比原有对称加密算法的收发双发自协商产生加密密钥，QKD 所提供的加密密钥在密钥分发过程的防窃听和破解的能力得到加强；另一方面 QKD 能够提升对称加密体系中的密钥更新速率，从而降低密钥和加密数据被计算破解的风险。

QKD 技术能够保障点到点的光纤或自由空间链路中的密钥分发的安全性。由于量子存储和量子中继技术距离实用化仍有一定距离，长距离的 QKD 线路和网络需要借助“可信中继节点”技术，进行逐段密钥分发，密钥落地存储和中继。密钥一旦落地存储，就不再具备量子态和由量子力学保证的信息论安全性，QKD 线路和网络中的“可信中继节点”需要采用传统信息安全领域的高等级防护和安全管理来保证节点自身的安全性。目前针对“可信中继节点”的安全性防护要求、

标准化研究工作正在逐步开展，测评工作有待加强。未来进一步加强可信中继节点技术要求、安全性分析和测评方法等标准的研究与实施，将是保障量子保密通信网络建设和应用的现实安全性的重要措施之一。通过明确可信中继节点的安全防护要求和实施方案并通过相关测评验证，结合符合相应等级要求的密钥中继管理方案，可以实现符合安全性等级保护要求的 QKD 组网和应用。

QKD 技术的信息论可证明安全性是指理论证明层面，对于实际 QKD 系统而言，由于实际器件（例如光源、探测器和调制器等）无法满足理论证明的假设条件，即可能存在安全性漏洞，所以 QKD 系统的现实安全性以及漏洞攻击和防御，一直是学术界研究的热点之一。前述的中科大郭光灿院士团队和上海交大金贤敏教授团队的研究报道，都是针对 QKD 实际系统的安全性漏洞进行攻击和防御改进的学术研究成果。需要指出的是，此类研究通常在完全控制系统设备的条件下，采用极端条件模拟（例如超高光功率注入等方式）来攻击系统获取密钥信息，与实际系统和网络中可行的攻击和窃听属于不同层面。并且此类研究的出发点和落脚点也是在于改进和提升 QKD 系统的实际安全性，通常都会给出针对所提出的攻击方式的系统防御策略和解决方案，而非否定 QKD 系统安全性。针对 QKD 系统和网络现实安全性的学术研究在未来将会持续进行，从实际应用层面而言，QKD 系统和网络也需要持续进行现实安全性研究和测评验证。

## （五）量子保密通信规模化应用与产业化仍需探索

QKD 系统的性能指标和实用化水平仍有提升空间。目前由于系

统协议，关键器件和后处理算法等方面的限制，商用 QKD 系统在现网中的单跨段光纤传输距离通常在百公里以内，密钥成码率约为数十 kbit/s 量级，系统传输能力和密钥成码率有待进一步提高。同时，QKD 设备系统的工程化水平也有一定提升空间，例如偏振调制型设备在抗光纤线路扰动方面存在技术难点；单光子探测器需要低温制冷，对机房环境温度变化较为敏感；QKD 系统和网络的管理和运维等方面尚未完全成熟。此外，量子保密通信系统和网络需要密钥管理设备和加密通信设备进行联合组网，密钥管理设备属于信息安全领域，加密通信设备属于信息通信领域，目前量子保密通信业界与信息通信行业和信息安全行业的合作与融合还比较有限，设备产品的工程化和标准化水平需进一步提升和演进。

量子保密通信技术的应用发展还面临加密体制的技术路线竞争。量子保密通信的应用背景主要是面向未来量子计算对于现有公钥加密体系的计算破解威胁。一方面，量子计算的发展目前还处于多种技术路线探索的样机实验阶段，尽管近年来发展加速，但是距离实现真正具备破解密码体系的大规模可编程通用化量子计算能力仍有很长的距离。另一方面，信息安全行业也在为应对量子计算可能带来的安全性威胁进行积极准备，目前以美国国家标准和技术研究院（NIST）主导的抗量子计算破解的新型加密体系和算法的全球征集和评比已经完成第一轮筛选，计划在 2023 年左右完成三轮公开评选，并推出新型加密体制标准，我国上海交大、复旦大学和中科院等单位提交的新型加密方案也参与其中。未来，抗量子计算破解的安全加密体制存



在量子保密通信和后量子安全加密的技术路线竞争，加快提升 QKD 系统成熟度、实用化水平和性价比，是抢占先机的关键。

量子保密通信的商业化应用和市场开拓仍需进一步探索。量子保密通信是对现有的保密通信技术中的对称加密体系的一种安全性提升，能够解决密钥分发过程的安全性问题，提升对称加密通信的安全性水平，但是并不能完全解决信息网络中面临的所有安全性问题。量子保密通信主要适用于具有长期性和高安全性需求的保密通信应用场景，例如政务和金融专网，以及电力等关键基础设施网络等，市场容量和产业规模相对有限，目前主要依靠国家和地方政府的支持和投入。量子保密通信技术的商业化应用推广和市场化发展仍然面临技术成熟度、设备可靠性和投入产出性价比等方面的考验，需要产学研用各方共同努力，从设备升级、产业链建设、标准完善和商用化探索等多方面共同推动。

我国面临的信息安全形势错综复杂，在政务、金融、外交、国防和关键基础设施等领域，提高信息安全保障能力的需求较为紧迫，对量子保密通信技术带来的长期信息安全保障能力有客观需求和应用前景。同时，量子保密通信技术的产业应用和市场化推广，也需要其自身技术成熟度、设备工程化、现实安全性和可靠性水平的不断提升，以满足规模化应用部署和运维管理等方面的条件和要求。针对量子保密通信系统设备的工程化和实用化的关键瓶颈开展基础性共性技术，例如高性能单光子探测器、集成化调制解调器和高性能后处理算法等领域的攻关突破，将政策支持的优势真正转化为核心技术和产品功能

性能的优势，进一步提升系统工程化水平和解决方案性价比，是应用发展演进和产业做大做强关键所在。

## 四、量子测量领域研究与应用进展

### （一）量子测量突破经典测量极限，应用领域广泛

信息技术包含信息获取、处理、传递三大部分，与测量、计算和通信三大领域分别对应。精密测量技术作为从物理世界获取信息的主要途径，在信息技术中起着至关重要的作用。精密测量不仅在基础科学研究方面具有重要的学术价值，而且还能服务于国家重大需求，对各领域的科学进步具有推动作用，因此具有重大的研究意义。精密测量的本质是测量系统与待测物理量的相互作用，通过测量系统性质的变化表征待测物理量的大小。经典的测量方法的精度往往受限于衍射极限、散粒噪声和海森堡极限等因素，测量精度提升面临困难。

近年来量子技术的发展，使得对微观对象量子态的操纵和控制日趋成熟，量子测量技术也应运而生。利用量子相干、量子纠缠、量子统计等特性可以突破经典力学框架下的测量极限，从而实现更高精度的测量。基于微观粒子系统和量子力学特性实现对物理量进行高精度的测量称为量子测量。在量子测量中，电磁场、重力、加速度、角速度等外界环境直接与原子、离子、电子、光子等量子体系发生相互作用并改变它们的量子状态，最终通过对这些变化后的量子态进行检测实现外界环境的高灵敏度测量。而利用当前成熟的量子态操控技术，可以进一步提高测量的灵敏度。



在量子计算、量子通信等领域，量子系统的量子状态极易收到外界环境的影响而发生改变，严重的制约着量子系统的稳定性和健壮性。量子测量恰恰利用量子体系的这一“缺点”，使量子体系与待测物理量相互作用，从而引发量子态的改变来对物理量进行测量。对于量子测量的定义，一直存在着争议和疑问。根据国内外量子信息技术领域技术分类和业界调研反馈，广义量子测量可以涵盖利用量子特性来获得比经典测量系统更高的分辨率或灵敏度的测量技术。量子测量技术应具有两大基本特征：一是操控观测对象是微观粒子系统，二是与待测物理量相互作用导致量子态变化，而具备以上两点特征的测量技术可以纳入量子测量的范畴。



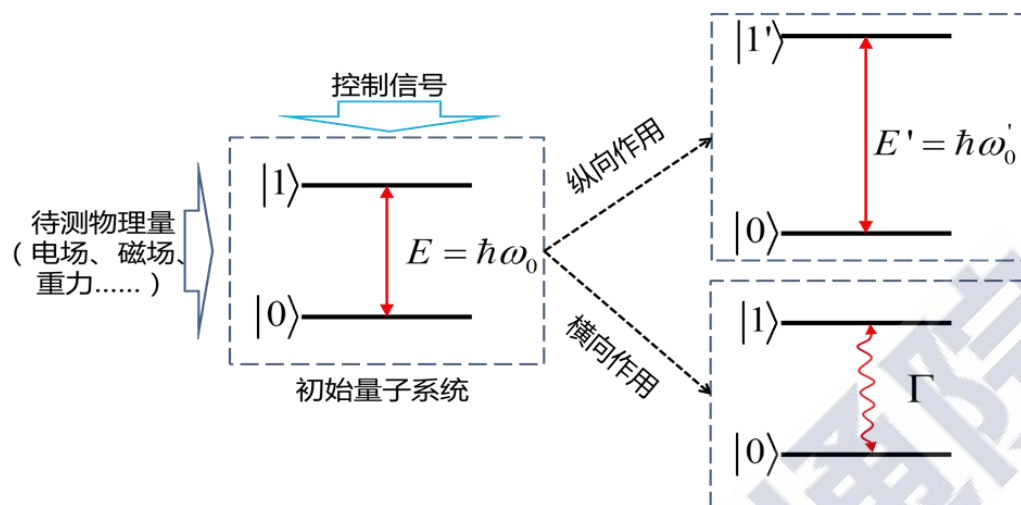
来源：中国信息通信研究院

图 14 量子测量的基本流程和主要步骤

量子测量可以分为以下五个基本步骤，如图 14 所示。其中，量子态初始化是将量子系统初始化到一个稳定的已知基态；初始测量态根据不同的应用及技术原理，通过控制信号将量子系统调制到初始测量状态；与待测物理量相互作用通过待测物理量（重力、磁场等）作用在量子系统上一段时间，使其量子态发生改变；量子态读取通过测量确定量子系统的最终状态（比如测量跃迁光谱、驰豫时间等）；结果转换则将测量结果转化为经典信号输出，获取测量值。

外界物理量和量子系统的相互作用可分为横向作用和纵向作用，其中的横向作用会诱导能级间的跃迁，从而增加其跃迁率；纵向作用通常导致能级的平移，从而改变其跃迁频率。通过测量跃迁率和跃迁

频率的变化实现物理量的探测，如图 15 所示。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 15 外界物理量与量子体系的作用机制

量子测量涵盖电磁场、重力应力、方向旋转、温度压力等物理量，应用范围涉及基础科研、空间探测、材料分析、惯性制导、地质勘测、灾害预防等诸多领域，当前量子测量研究和应用的主要领域及其技术体系如图 16 所示。通过对不同种类量子系统中独特的量子特性进行控制与检测，可以实现量子惯性导航、量子目标识别、量子重力测量、量子磁场测量、量子时间基准等领域的测量传感，未来发展趋势主要是高精度、小型化和芯片化。



来源：中国信息通信研究院

图 16 量子测量主要应用领域和技术体系

按照对量子特性的应用，量子测量分三个层次，第一层次是基于微观粒子能级测量；第二层次是基于量子相干性（波状空间时间叠加态）测量；第三层次是基于量子纠缠进行测量，突破经典的理论极限。其中，前两个层次虽然没有充分利用量子叠加和纠缠等独特性质，但是目前技术较成熟，涉及面宽，涵盖了大部分量子测量场景，部分领域已经实现产品化。第一层次从 20 世纪 50 年代就逐步在原子钟等领域开始应用。近些年随着量子态操控技术研究的不断深入，基于自旋量子位的测量系统开始成为研究热点，通过外部物理量改变能级结构，通过探测吸收或发射频谱对外部物理量进行测量。第二层次主要利用量子系统的物质波特特性，通过干涉法进行外部物理量的测量，广泛应用于量子陀螺仪、量子重力仪等领域，技术相对成熟，精度较高，但是系统体积通常较大，短期内较难实现集成化。第三个层次条件最为严苛，同时也最接近量子的本质。基于量子纠缠的量子测量技术研究还比较少，主要集中在量子目标识别、量子时间同步和量子卫星导航

领域。受制于量子纠缠态的制备和测量等关键技术瓶颈，目前主要在实验室研究阶段，距离实用化较远。

## （二）自旋量子位测量有望实现芯片化和集成应用

利用自旋量子位进行精密测量是量子测量领域中一个相对较新的领域。量子体系的自旋态地与磁场强度相关，磁场变化会导致自旋量子位的能级结构变化，从而改变辐射或吸收频谱，通过对谱线的精密测量就可以完成磁场测量。另外，自旋量子位的能级结构还与温度、应力有关，利用类似原理实现温度、应力的精密测量。在自旋量子位上沿特定方向加外磁场，当自旋量子位发生旋转或者与磁场发生相对位移时，可实现角速度和加速度的精密测量。基于自旋量子位的测量体系的优点在于高灵敏度和高频谱分辨率，自旋量子位的操控和读取对环境要求较低，便于应用。其空间分辨率远小于光学成像的衍射极限，有望用于对微纳芯片和生物组织的检测与成像。

金刚石氮位（Nitrogen-Vacancy, NV）色心是一种近期备受关注的自旋量子位，可实现对多种物理量的超高灵敏度检测，广泛地应用于磁场、加速度、角速度、温度、压力的精密测量领域，具有巨大的潜力。目前金刚石色心测量系统已实现芯片化，基于金刚石色心的芯片级陀螺仪、磁力计、磁成像装置均有报道。例如美国 MIT 今年首次报道了在硅芯片上制造了基于金刚石色心的量子传感器，实现对磁场的精密测量，功能包括片上微波的产生和传输，以及来自金刚石量子缺陷的携带信息荧光的片上过滤和检测，器件结构紧凑，功耗较低，在自旋量子位测量和 CMOS 技术的结合方面迈出关键一步。此外，



金刚石色心量子测量还能实现纳米级的空间分辨率。中科大今年首次实现基于金刚石色心的 50 纳米空间分辨力高精度多功能量子传感。该成果为高空间分辨力非破坏电磁场检测和实用化的量子传感打下了基础，可应用于微纳电磁场及光电子芯片检测，拓宽远场超分辨成像技术应用场景。自旋偶极耦合在密集自旋体系中产生压缩，有望使测量灵敏度接近海森堡极限。

### （三）量子纠缠测量处于前沿研究，实用尚有距离

量子纠缠作为量子光学乃至量子力学最为核心的课题，获得了研究者的广泛关注。随着 EPR 佯谬的提出，人们逐步发现并确认了量子态的非定域性。

利用量子纠缠这种非定域性可以实现距离的精确测量，一对纠缠光子包含信号光子和闲置光子，将信号光子发往距离未知的待测位置，闲置光子发送到位置固定的光电探测器，分别记录光子的量子态和到达时间，并通过经典信道进行信息交互，通过联合测量两地到达时间可以计算出距离。如果采用三组基点对统一位置进行测量，就可以在三维空间中唯一确定待测点的位置，基于此原理即可实现量子卫星定位系统（QPS）用于高精度量子定位导航。如果距离是已知参数，根据此原理还可用于测量两地的时钟差，进而实现两地的高精度时钟同步，此原理被应用在量子时间同步协议中。类似于量子通信的原理，如果测量过程中存在窃听者，纠缠态会遭到破坏，测量数据将不再关联，从而达到防窃听的目的，也提高了系统的安全性。

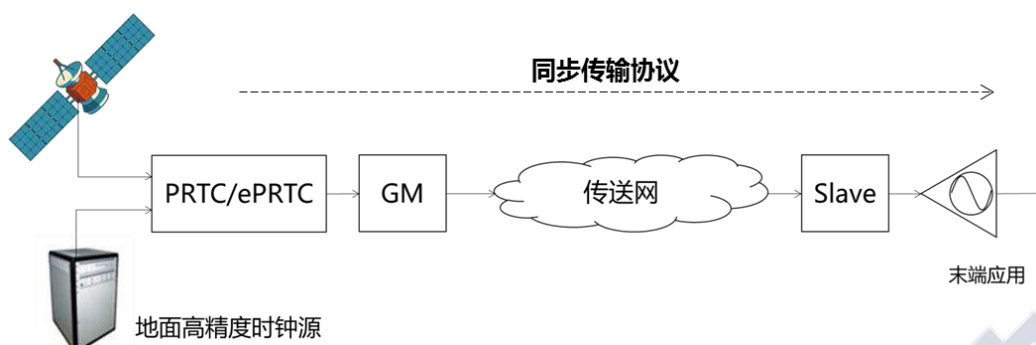
量子纠缠特性还广泛应用于量子目标识别领域。干涉式量子雷达

和量子照射雷达都将纠缠光作为光源。干涉式量子雷达使用非经典源（纠缠态或压缩态）照射目标区域，在接收端进行经典的干涉仪原理进行检测，通过利用光源的量子特性，可以使雷达系统的距离分辨能力和角分辨能力突破经典极限。量子照射雷达在发射信号中使用纠缠光源扫描目标区域，在接收处理中进行量子最优联合检测，从而实现目标的高灵敏探测。

目前，基于量子纠缠的量子测量多处于理论研究阶段，原理样机的报道较少。主要原因在于高质量性能稳定的纠缠源制备目前尚未实现突破，另外高性能单光子探测技术瓶颈也制约其发展，单光子探测器的灵敏度、暗计数、时间抖动等性能参数直接决定了量子测量的精度，有待进一步改进和提升。

#### （四）超高精度量子时钟同步有望助力未来通信网

随着 5G、物联网、车联网等新兴技术的兴起，时间同步精度的需求也日益提高。从早期的日晷，水钟，到机械钟，石英钟，再到原子钟，人类对时间的测量越来越精确。目前通信网络中主要使用 GPS 卫星信号提供高精度的时间源，但卫星信号不再能满足未来通信网络的全部需求，主要原因包括：卫星信号不能覆盖室内场景，卫星授时可靠性和安全性待提高，卫星接收机成本高。为了满足未来通信网络同步需求，需研究超高精度时钟源和高精度同步传输协议，其未来应用如图 17 所示。其中，量子时钟源可以提供不确定度优于  $1\text{e-}17$  超高精度时钟源，量子时间同步协议结合量子纠缠等技术可以为未来通信网络提供高精度和高安全性的同步传输协议。



来源：中国信息通信研究院

图 17 高精度时钟同步在通信网络中的应用

量子时钟源利用原子能级跃迁谱线的稳定频率作为参考，通过频率综合和反馈电路来锁定晶体振荡器的频率，从而得到准确而稳定的频率输出。根据跃迁频率范围分类，量子时钟源可分为光钟和微波钟两大类。目前微波钟的不确定度最高可达到 $\sim 1\text{e-}16$ 量级。由于时钟源的稳定性和精度极大程度上取决于参考谱线的线宽  $\Delta\nu$  与谱线中心频率  $\nu$  的比值  $\Delta\nu/\nu$ 。光波频率比微波频率高 4~5 个数量级，并且光学频率标准的频率噪声远小于原子钟，与原子微波钟相比，光钟的稳定性、精度和位相噪声都有数量级的改善。

由于还没有电子系统能够直接并准确地记录原子及离子  $5\text{e}14$  次/秒的光学振动，需要一种有效连接光频与射频的频率链。光学频率梳为超高精度同步实现提供了新的技术手段，可将光频率的稳定性和精度“传递”到微波频率，使得微波原子钟具有与光钟相同的输出特性，提高时钟输出精度。光学频率梳也是量子时钟源的一个重要研究方向。高精度与小型化是量子时钟源两大发展趋势，高精度量子时钟源可用于协调世界时(UTC)产生，小型化芯片级量子时钟源可用作星载钟，在卫星导航和定位等领域发挥重要作用。

随着高精度时间同步技术在基础科研、导航、定位、电力、通信

以及国防等方面的广泛应用，将对同步传输精度提出更高要求。时频网络由多时钟源组成，即使所有的时钟源都具有非常高的精度，由于时钟源之间存在频率差和初始相位差，各钟面读数仍不相同，需要时间同步协议对网络中的时钟源进行同步和修正。

量子时间同步协议与经典同步协议相比，具有同步精度高、安全防窃听、可消除色散等优点，从而受到广泛的关注。根据理论分析，经典同步协议受限于经典测量的散粒噪声极限，而对于量子时间同步协议，其准确度将达到量子力学中的海森堡极限，比经典时间同步极限提高 $\sqrt{MN}$ 倍，其中  $N$  为一个脉冲中包含的平均光子数， $M$  为脉冲数。目前经典时间同步技术最高精度可达 100ps，目前量子时间同步协议原理性实验中，时间同步精度有望进入 ps 量级。

量子时间同步系统可以把量子时间同步协议与量子保密通讯相结合，开发出具备保密功能的量子时间同步协议，从而有效对付窃密者的偷听行为。通过通道间的频率纠缠特性还可以消除传播路径中介质色散效应对时钟同步精度的不利影响。目前，远距离量子时间同步协议的研究工作尚处于原理探索研究阶段，关于系统实验和应用的报道较少。量子纠缠及压缩态的光子的制备成为制约该领域发展的重要瓶颈，距离实用化仍较远。量子时钟源提供了超高精度的时间和频率基准源，量子时间同步协议提供了一种高精度、安全防窃听的同步信息传输机制，二者结合有望能够满足未来通信网络时间基准需求。

## （五）量子测量产业初步发展，仍需多方助力合作

量子测量技术涉及军事、民生、科研诸多领域，各国竞相布局。



图 18 为欧美国家和我国量子测量领域科研和产业发展情况。欧美国家量子测量领域多为高校、研究机构、企业、军队、政府多方联合助力，共同推进技术发展和产业推广，实现研究成果落地和产品化。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 18 量子测量科研及产业发展情况

目前量子时钟源、量子磁力计、量子雷达、量子重力仪、量子陀螺、量子加速度计等领域均有样机产品报道，可应用于军事、航天航空、医疗、能源、通信等领域，国内的研究多集中于高校和科研机构，从科研成果来看，部分领域与欧美国家仍有一定差距，总体稳步推进。但是，与欧美国家相比，国内研究机构和行业企业之间的合作交流十分有限，缺乏沟通合作的平台与机制，成果转化和知识产权开发较为困难。目前国内已经产业化的领域多集中在量子时钟源领域，少数企

业致力于量子目标识别，量子态操控与读取等领域的研发。

从产业分析来看，量子测量产业市场收入将稳步增长。根据 BCC Research 的统计分析，全球量子测量市场收入由 2018 年的 1.4 亿美元增长到 2019 年的 1.6 亿美元，并预测未来 5 年年复合增长率将在 13% 左右。欧美国家，特别是北美地区量子测量产业收入最高，预计将继续主导收入份额。北美地区是量子测量先进技术的领导者和推动者，亚太地区特别是中国，有望为量子测量产业提供巨大的市场。随着国内对车联网、物联网、远程医疗等新兴技术研究的持续升温，超高精度低成本的传感器、生物探针、导航器件等关键器件的需求量会呈指数增长，为量子测量产业提供了广阔的市场空间。

量子测量领域具有巨大的发展潜力和广阔的市场前景，我国量子测量领域某些关键技术研究仍处于跟随阶段，与世界先进水平的指标参数仍有数量级的差距。量子测量在实际应用中，不同的应用场景对性能指标的要求不尽相同，需要完备的指标体系，不是简单地追求某一个性能参数的不断提升。实验室研究应与实际应用、产业发展紧密结合，在追求性能指标提升的基础上，更加关注集成化、实用化和工程化，并掌握自主知识产权。

## 五、量子信息技术发展与应用展望

### （一）理论与关键技术待突破，领域发展前景各异

量子信息技术的研究和应用发展植根于量子物理学的基础研究和理论探索。通过认识和利用微观粒子系统的物理规律引发了第一次

量子科技革命，诞生了半导体、激光和核能等新技术领域。而直接观测和操控光子、电子和原子等微观粒子系统，并借助量子叠加和纠缠等特性进行信息采集、传输和处理，则是以量子信息技术为代表的第二次量子科技革命的主要特征。

现阶段的量子物理学理论虽然能够对量子叠加、量子纠缠、量子遂穿等微观粒子系统的独特实验现象和观测结果进行严谨描述和精确预测，即回答了“是什么”的问题，但是距离理想和完备的刻画和解释微观物质世界的运行规律，即回答“为什么”的问题，仍有令人困惑之处。例如，微观世界量子态和宏观世界经典态之间的界限与联系何在；既按照薛定谔方程演化又在测量时坍缩的波函数是物质波还是概率波；微观量子系统和经典测量仪器如何区分界定等。量子物理学的理论问题仍在激励物理学家不断研究和探索，未来的重大理论突破将进一步促进和推动量子信息技术的研究和应用发展。

量子信息三大技术领域在研究发展水平，技术实用化程度，产品工程化能力和产业化应用前景等方面各有差异，如图 19 所示。量子信息技术的研究和应用仍面临一些共性关键技术和核心问题瓶颈需要进一步攻关突破。例如，量子通信中的高质量量子态光源，高效纠缠制备分发及探测，高性能单光子探测，以及量子态存储与中继技术等；量子计算中的高维纠缠态制备与操控，高品质样品材料制备，超低温和磁场隔离环境，高精度操控测量系统等；量子测量中的高精度操控系统和集成化隔离屏蔽环境等。上述基础共性关键问题研究的攻关和突破，是量子信息技术进入实用化和产业化主要控制性因素。





来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 19 量子信息技术发展与应用趋势展望

量子信息技术研究和应用探索发端于上世纪九十年代，目前总体处于基础科研向应用研究转化的早期阶段，其技术发展演进和应用产业推广既具有长期性，也存在不确定性。总体而言，真正具有改变游戏规则和颠覆性意义的“杀手级应用”尚未出现，各领域新兴技术的商业化应用和产业化发展的路线有待进一步探索。

在量子计算领域，基于多种技术路线的物理平台探索和量子物理比特数量提升持续取得进展，“量子优越性”得到首次验证。但可扩展量子计算的物理平台实现方案仍未明确，可容错量子逻辑比特仍未实现，量子计算解决实际计算困难问题的算力优势尚未充分验证，量子计算的适用范围和能力边界仍需进一步探索。未来五年内可能在专用处理器和某些应用领域取得一定突破，但实现通用化可编程量子计算仍是长期而艰巨的任务。

在量子通信领域，进入实用化阶段的量子密钥分发主要面向信息安全领域应用，其应用范围和影响力相对有限，同时面临后量子安全加密技术的竞争，商业化应用和产业发展仍需进一步探索。量子隐形



传态和量子存储中继技术是实现未来量子信息传输和组网的重要方向，未来仍处于理论研究和实验探索阶段，实用化前景不明朗。

在量子测量领域，原子钟、核磁共振陀螺和单光子探测等基于已有技术平滑升级演进的量子测量方向发展更加成熟，实用化水平更高。而基于量子相干性检测和量子纠缠探测的新技术方向在技术成熟度、设备集成化和工程化水平等方面仍有较大提升空间。未来量子测量在国防和航天等领域的应用有可能率先取得突破。

## （二）我国具备良好的实践基础，机遇和挑战并存

我国在量子信息技术领域的研究和应用虽然起步稍晚，但与国际先进水平没有明显代差，在量子计算、量子通信和量子测量三大技术领域均有相关研究团队和工作布局。近年来，在科研经费投入，研究人员和论文发表数量，研究成果水平，专利申请布局，应用探索 and 创业公司等方面具备较好的实践基础和发展条件。我国已经成为全球量子信息技术研究和应用的重要推动者，与美国和欧洲共同成为推动量子信息技术发展和演进的重要力量。

量子通信方面，中科大、清华、北大、北邮和上海交大等研究机构的研究成果与国际先进水平基本同步，在量子保密通信试点应用、网络建设和星地量子通信探索方面处于领先。量子保密通信产业基本形成，国科量子、科大国盾、安徽问天和上海循态等公司积极探索和推动应用与产业发展，各地方政府、电网、银行和互联网企业等单位开始探索采用量子保密通信进行信息安全保护。

量子计算方面，中科大、清华、浙大和中科院等研究机构也取得

多项具有世界水平的研究成果，例如 20 光子量子计算的玻色采样实验处于领先，已报道 20 比特超导量子计算实验，预计未来 1-2 年可达到 50 比特量级。同时，阿里、百度、腾讯和华为等科技公司开始投入量子计算硬件平台、软件算法和应用探索的研究，本源量子等初创公司也开始崭露头角。

量子测量方面，中科大、北航、中科院和航天科工等科研机构在量子陀螺、重力仪、磁力计、时间基准等领域开展了大量研究，研究成果和原理样机的关键指标参数与国际先进水平的差距正在逐步缩小。在量子随机数参考基准和量子时频同步网络等应用探索方面，也开始进行布局 and 推动。同时，国耀量子雷达和国仪量子等初创公司在单光子光学雷达和 NV 色心谱分析等领域开展应用探索。

我国在重大项目组织协调方面具备集中力量办大事的体制优势，同时快速发展的经济水平，较为完备的工业体系和体量庞大的统一市场也能够为量子信息领域新兴技术的应用和产业发展提供广阔空间和有力支撑。量子信息技术发展演进存在技术路径、应用探索和产业模式不确定性，学术界开放探索和研究合作仍是主流，产业界尚未形成技术壁垒和寡头垄断。我国具备在量子信息技术领域聚力加快发展，力争与国际先进水平实现并跑或领跑的时间窗口和宝贵机遇。

我国量子信息技术发展和应用探索也存在一些问题瓶颈和挑战。量子信息领域研究发展和应用探索的顶层设计和规划布局尚未形成有机整体，对重点研究领域的规划指导和投入支持力度不足。学术界普遍存在论文导向的科研模式，与产业界融合进行应用探索和产业推

动的合作交流有限，科技企业参与度和初创公司活跃度较低，科研合作与应用转化机制待探索。同时在支持量子信息技术发展和应用的产业基础，例如材料样品、制冷设备、操控系统等方面仍有一些短板，未来可能成为制约工程化实现和实用化推广的关键瓶颈。在人才引进、培养和选拔机制方面的管理和评价机制缺乏灵活性和多样性，在与量子信息技术配套的工程、工艺、软件、测评和标准化等方向的专业化人力资源的支撑能力较弱。

量子信息技术的发展和应用具有重要性和长期性，在国家层面制定量子信息领域整体发展战略，推出总体发展规划，加快论证实施相关科技项目，协同推进国家实验室建设，可以有效引导和推动研究和应用发展。在量子计算领域，建立研究机构与其他科研院所，以及信息通信、化工制药、人工智能等领域产业界的合作平台与机制，依托实际需求进行计算困难问题在量子计算处理器和云平台的建模解析、算法映射和协同研发，是促进量子计算实用化研究的有效途径。在量子通信领域，对于已经进入实用化的量子密钥分发和量子保密通信，依托现有试点项目和网络建设，组织开展标准制定、测评认证、产业发展政策等应用研究，进一步促进商用化推广和产业发展成熟。在量子测量领域，加强科研项目布局中的工程化和实用化指标考核，推动研究成果落地转化，以及研究机构和行业应用部门的沟通交流合作。此外，量子信息技术研究和应用涉及诸多工业基础配套和工程研究环节，加强在材料工艺、核心器件和测控系统等问题瓶颈的攻关突破，对于应用和产业的可持续发展具有重大意义。

CAICT 中国信通院



中国信息通信研究院

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮政编码：100191

联系电话：010-62300592

传真：010-62304980

网址：[www.caict.ac.cn](http://www.caict.ac.cn)

